



レビュー論文

高速点火レーザー核融合実験用クライオジェニックターゲットの開発

Development of Cryogenic Targets for Fast Ignition Laser Fusion Experiment

岩本晃史, 藤村 猛^{1,2)}, 中井光男¹⁾, 乗松孝好¹⁾, 坂上仁志, 白神宏之¹⁾, 疇地 宏¹⁾IWAMOTO Akifumi, FUJIMURA Takeshi^{1,2)}, NAKAI Mitsuo¹⁾, NORIMATSU Takayoshi¹⁾,SAKAGAMI Hitoshi, SHIRAGA Hiroyuki¹⁾ and AZECHI Hiroshi¹⁾核融合科学研究所, ¹⁾大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, ²⁾㈱キーエンス

(原稿受付: 2013年2月8日/原稿受理: 2013年5月17日)

大阪大学レーザーエネルギー学研究センターと核融合科学研究所では双方向型共同研究の枠組みの下, FIREX 用クライオジェニックターゲットの開発を進めている. ターゲットのシェル内に $\sim 20\ \mu\text{m}$ 厚の均一な固体燃料層を形成する手法の開発が課題となっている. 現在二つの燃料層形成手法: フォーム法とコーンガイド加熱法の開発を進めている. フォーム法では, 液体と固体の密度差から生じる残留気泡の抑制が最大の課題であり, 本研究では(フォーム材の代わりに使用した)プリズム状のエアロゲル材中に充填率約99%の固体水素の形成に成功している. 開発した手法は実ターゲットへも応用可能であることがシミュレーションにより確認されている. 一方, コーンガイド加熱法では直径2 mmのPSシェルターゲット中に155 \sim 192 μm の固体水素層の形成実証に成功している. このように燃料層形成手法の原理実証は終了し, ターゲット開発は実ターゲットを用いた燃料層形成の実証へと移行する最終段階に至っている.

Keywords:

fast ignition laser fusion, cryogenic targets, fuel layering, solid hydrogen refractive index

1. はじめに

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター(以後, レーザー研)では, ペタワットレーザーを使用した高速点火レーザー核融合の加熱実証に成功した成果[1]をもとに, 次の段階として高速点火方式による点火の実証を目的とした高速点火実証実験(FIREX)プロジェクトが進められている[2, 3]. 爆縮用激光XII号と点火用Laser for Fusion Experiment (LFEX)の二つのレーザーシステムを用い, これまでに約1 keVの加熱に成功している[4]. 典型的なターゲットの構成を図1に示す. ターゲットはプラスチックシェル内に形成された固体燃料球殻, 点火レーザーをガイドするコーンガイド, シェル内に直接燃料を供給するためのガラス製充填管から成っている. 図ではこれまでの実験において加熱実証に成功した金製シングルコーンが取り付けられているが, 点火レーザーによる加熱効率を向上させるためにダイヤモンドライクカーボン(DLC)コーン[5], 金製ダブルコーン[6], TONGARI コーン[7]などシミュレーション研究を基にした提案がなされ, 各コーンの性能評価が行われている. また, 現状では高速点火の原理実証に注力するため, 数多くの完成品から性能の安定したものを選択し使用することができるよう重水素化ポリスチレン(deuterated PS)シェルを燃料とした実験が行われている. しかし, 将来の核融合炉開発を見据えると重水素(D_2)または重水素-三重水素(DT)燃料を充填したクライオジェ

ニックターゲットの開発が必要である.

これまでクライオジェニックターゲットの開発は中心点火方式を対象に行われてきた. 特にレーザー核融合による点火燃焼を目的に実験が進められている米国の国立点火施設(NIF)やレーザー核融合の基礎実験を行っているロチェスター大学レーザーエネルギー研究所(LLE, Rochester Univ.)では実験に使用するターゲットの研究開発を長年継続しており, 必要な仕様とされる固体DT燃料層をもつターゲットをレーザー実験に供給する段階に至っている[8-11]. 均一な燃料層の形成が最大の課題であるが, その燃料層の形成にはベータ線法[12, 13]と呼ばれる方法が主

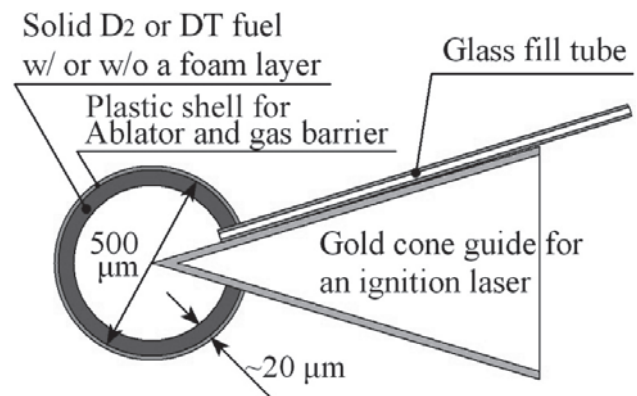


図1 典型的な FIREX クライオジェニックターゲットの構成.

National Institute for Fusion Science, Toki, Gifu 509-5292, Japan

¹⁾Institute of Laser Engineering, Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

Corresponding author's email: iwamoto.akifumi@LHD.nifs.ac.jp

として用いられている。三重水素のベータ崩壊により発生するエネルギーを利用して燃料層を加熱、その結果、燃料層の不均一性に起因して温度差が生じ、高温部では燃料の昇華が起こると同時に蒸気圧も上昇し蒸気圧の低い低温部で再固化する。このように燃料自身の体積加熱によりシェル内の固体燃料の再配分を促し、ある一定時間かけて均一な燃料層を形成させる。一方、 D_2 燃料を使用する実験には別の方法を用いて燃料層が形成されている。 D_2 はある波長の赤外線を選択的に吸収する特性があり、その吸収ピークを利用して燃料を加熱、ベータ線法と同様に燃料層の不均一性に起因する温度差で燃料層を均一化する方法が開発されている[14, 15]。このような燃料層形成手法の開発と同時に、実験へのターゲットの供給には形成された固体燃料層の評価方法の開発も重要な課題である。NIF や LLE ではシャドウグラフ法やX線位相コントラスト技術による燃料層の評価が行われており[16, 17]、仕様通りの燃料層が形成されているターゲットを選択すると同時に燃料層の詳細な調査を行い実験に供給している。

さて、レーザー研と核融合科学研究所（以後、核融合研）では2003年度から双方向型共同研究の枠組みの下、図1に示した FIREX 用クライオジェニックターゲットの開発を進めている。ターゲットの製造・組立、そのシェル内面に $\sim 20\mu m$ 厚の固体燃料層を均一に形成する手法や燃料層の評価手法の開発が課題となっている。このターゲットは中心点火方式用ターゲットとは異なり球対称性をもたないターゲット構造のため既存の技術を応用できず、燃料層形成には独自の研究開発が必要である。そこで現在、二つの燃料層形成手法：フォーム法、コーンガイド加熱法を用いた開発を進めている。本報告では燃料層形成技術開発とその関連研究に関するこれまでの成果と今後の課題について述べる。

2. フォーム法の実証研究

フォーム法は中心点火方式によるレーザー核融合炉用ターゲットに応用するために米国の研究者が1980年代に提案した方法[18]であり、アブレーター層および燃料層の形成を目的として現在も開発が続けられている。我々は、その概念を FIREX 用ターゲットの仕様に合わせて最適化する検討を行っている[19]。フォーム法では燃料層として必要な厚さや均一性などを有するフォーム球殻をあらかじめ形成し、そのスポンジ状フォーム材内に毛細管現象を利用して液体燃料を均一にしみ込ませ、その後、固化する。その結果、必要な仕様を満たす固体燃料層を完成させることができる。この形成過程では毛細管現象により燃料が浸透し、微細な構造内で表面張力が燃料層を維持するため重力などの影響を無視できる。このように液相ではフォーム材自体が燃料層の均一性を保つ。しかしその後の固化が無秩序に起これば、液体と固体間の密度差分の気泡が含まれた固体燃料層が形成される可能性[20]が指摘されており、その解決が本手法の重要課題となっている。軽水素 (H_2)、 D_2 、DT の場合、その密度差から11~12%の気泡が固体内に残留する可能性がある[21]。我々はフォーム材に染み込

んだ液体燃料を固化させる際に気泡の形成を抑える手法を提案した。これまでに専用の試料を作製し、その原理実証実験を行った。また、提案した固化手法の実機フォームシェルターゲットへの応用について ANSYS を使用したシミュレーションにより検討を行った。

先に述べたように形成された燃料層の評価も開発課題の一つであり、我々もその開発に着手している。これまでにフォーム層内に充填されている固体燃料の量を試験的に評価したので、それについても簡単に述べる。

2.1 フォームシェルターゲットの製作・組み立て

レーザー研が中心となりフォームシェルターゲットの製作・組み立てに関する研究を行っている。本報告では詳しく述べないが、関連技術：フォームシェルの製造[22, 23]、シェルのレーザー加工[24]、コーンガイドの製造[25, 26]、ターゲットの組み立て[27]について現在開発が行われている。さて、そのフォームシェルについては大量生産可能な製造法について検討を行っている。現在、実際にシェルの形成に使用されている材料はエアロゲル材料の一つであるレゾルシノール・ホルムアルデヒド重合体 (RF) であり、100 nm 程度のセルが集合した多孔質構造となっている[28] (フォーム法は手法の一般的名称として使用されており、実験では開発に成功しているエアロゲル材料の RF を使用している。フォーム材とエアロゲル材は多孔質の構造やセルサイズが異なる)。図2にそのシェルの断面写真を示す (図2は先に投稿した文献[29]に記載されており、ここからの引用である。また図14までは同様である)。これまでに直径約500 μm 、エアロゲル層厚約20 μm のシェルの試作に成功している。次にコーンと燃料充填管を取り付けるための RF のレーザー加工技術については安定に加工が可能なレーザー加工技術の開発を終了している。先に述べたように効果的なコアプラズマの加熱のために数種類のコーンガイドが提案されており、これまでに金製シングルコーンによりコア加熱に成功している。そのシングルコーンを取り付けた典型的な FIREX ターゲットを図3に示す。図に示された RF シェルは直径521 μm 、18 μm のエアロゲル層厚、密度は90 mg/cm^3 であった。組み立てられたターゲットは機械的な問題を解決し[30]、シミュレーションおよび予備実験により極低温実験に使用可能であることを確

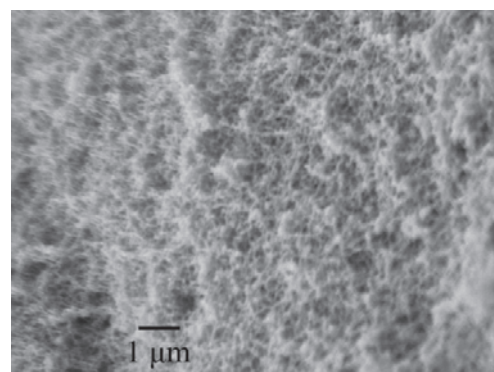


図2 RF エアロゲルの SEM 写真 (文献[29]からの引用)。

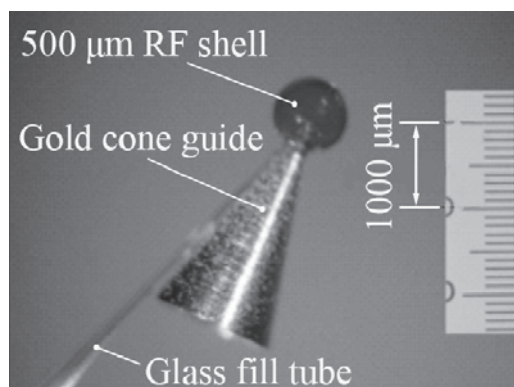


図3 組み立て後のFIREX用RFシェルターゲット（文献[29]からの引用）。

認している。本報告ではその典型的なターゲットを基本に燃料層形成技術について考察する。

2.2 フォーム法のための燃料層均一化のアイデア

フォーム材中での固体燃料層形成時に気泡が残留する問題については、その発生を抑制する手法の開発がフォーム法の重要課題の一つである。もし対策を講じない場合、固化転移が無秩序に起こり液体と固体の密度差からフォーム材を形成する各セル内に気泡が発生することになる。その気泡の発生を抑制する対策として、固体へと転移している界面に対し密度差分の燃料を液相で供給しながら固化を進める方法を提案する。この液体を供給し続ける能力として多孔質材の毛細管現象を利用する。固化制御を実現する環境作りがこの方法の成功の鍵となる。本報告では固化の進展方向を固定するために対象とするフォーム材に単一温度勾配を発生させる方法を採用し、その環境の実現を実験的に実証する。図4にはそのアイデアの概念が示されている。また、実験ではエアロゲル材を用いるためその概念もエアロゲル材の構造を考慮している。図4 (a)では毛細管現象により液体燃料がエアロゲル材に均一に浸透した様子を示している。固化制御を行わなかった場合に密度差分の残留気泡がセル内に発生している様子を図4 (b)に示している。直径100 nmのセルを仮定すると直径約50 nmの気泡ができる計算である。無気泡固化実現のための対策を講じた理想的な固化過程を図4 (c)に示している。エアロゲル材の上下で温度差を発生させ、系全体の温度を燃料の固化温度以下に徐々に低下させる。固化は温度が最も低い下端から始まり系全体の温度の低下と共に温度の高い上方へと進展するはずである。その固化の先端では毛細管現象により自然に液体燃料が液-固界面に供給される。セルサイズと浸透速度の関係には注意が必要であるが固化先端が通過後、理想的には無気泡の固体層形成が期待できる。

2.3 エアロゲル材への無気泡固化実証試験

2.3.1 実験準備

前節で提案した方法の原理的実証を行うための試料として、シェル形状にこだわらず理想的な固化制御を実現できると同時に状態の観測が容易な三角柱のプリズム形状を採用した。核融合研では自主規制によりD₂が使用できないため代替燃料としてH₂を使用した。また、新たな試みとして

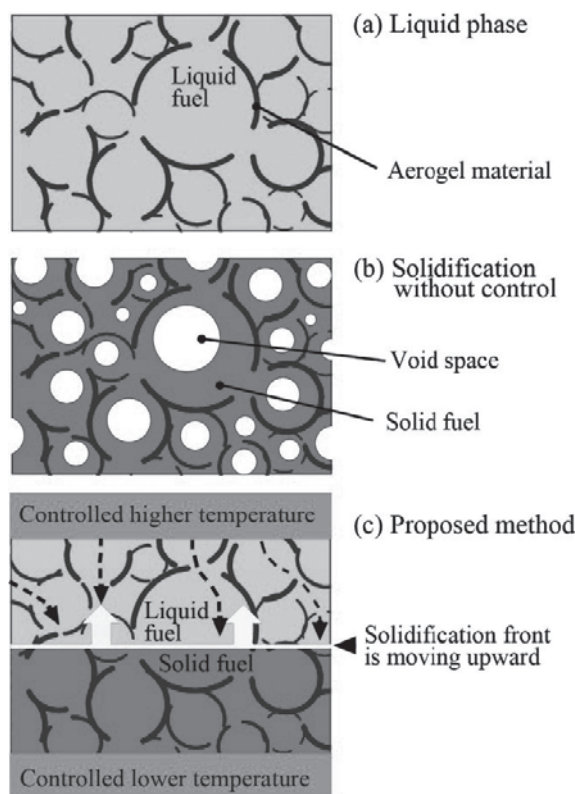


図4 エアロゲル材内での無気泡固化のアイデア。(a)毛細管現象により各セルには液体燃料が均一に充填されている。(b)無制御固化の結果、気泡が固体燃料内に残留している。(c)温度勾配による固化制御。下方から固化が始まり、系の冷却温度の低下と共に固化の先端が上方へと移動する。毛細管現象により液体燃料が継続して固体と液体の界面に供給され気泡の形成を防止する（文献[29]からの引用）。

屈折率から残留気泡を評価する方法を採用した。干渉計測による屈折率の評価や試料の温度制御のため、試料は三角柱に組まれたガラスプレート間にRFエアロゲル材が充填され、その上下をセルノックス温度センサー付きの銅板で挟まれた構造である。組み立ては全てエポキシ樹脂による接着である。上部銅板には温度調整用のヒーターが取り付けられている。評価の結果、このエアロゲル材の密度は約95 mg/ccであった。その試料の概略図を図5に示す。固体水素単体の屈折率を評価するために、全く同じ形状を持つ別の試料：エアロゲル材なしプリズムも製作した。製作した二つのプリズムに液体および固体水素を充填し屈折率を評価するために、一つずつ専用の光学窓付き冷却装置[31]に入れ、低圧のヘリウムガスによる自然対流熱伝達の冷却条件下で実験を行った。試料を納めている容器には温度を制御できるふく射シールドが取り付けられており、その温度を制御することで冷却ヘリウムガスの温度を制御している。エアロゲル材中に形成された固体水素の気泡率はそれら二つのプリズムで評価した屈折率の差から評価ができるが詳細は後で述べる。

2.3.2 屈折率評価のための干渉計測系

屈折率評価にはマイケルソン型干渉計を使用した。そのシステムを図6に示す。二つの波長：632.8 nm (CVI Melles Griot Inc.), 594.1 nm (Thorlabs Inc.) のHe-Neレー

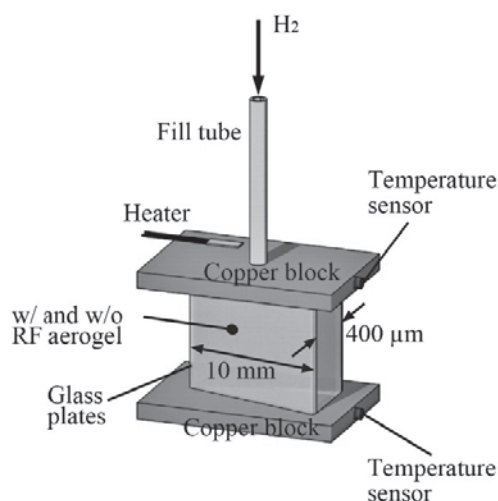


図5 制御された固化による無気泡固体燃料層形成実証に用いた試料。ガラス板の間にエアロゲル材を充填している試料と充填していない試料の2種類用意した。数10 mKの誤差を持つCernoxTM温度センサーを銅ブロックに取り付けている。温度勾配は上部銅板に取り付けたヒーターにより発生させる（文献[29]からの引用）。

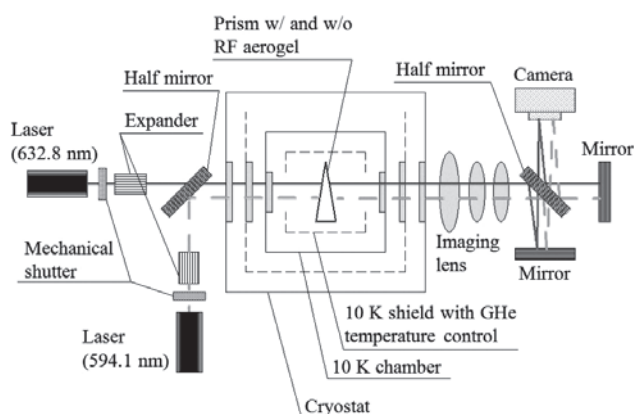


図6 屈折率評価のための干渉計測系（文献[29]からの引用）。

ザーを使用し波長の依存性について評価する。各光線はエキスパンダーにより拡大され、その半分はプリズムを透過、残りの半分はプリズム外を進み、イメージングレンズ系を経由し最終ミラー系で干渉像が形成される。屈折率は次の式で評価ができる。

$$I_{\text{sol}}/I_{\text{liq}} = (n_{\text{liq}} - 1)/(n_{\text{sol}} - 1) \quad (1)$$

ここで I_{liq} と I_{sol} はそれぞれ液相と固相で測定された干渉縞間隔を表している。また n_{liq} , n_{sol} はそれぞれの屈折率である。今回使用した干渉計測系では I_{sol} と I_{liq} の比の情報しか得ることができないため、液相での測定によって得られた情報を過去の研究[32]で既知の n_{liq} に近似し、固体の屈折率を評価した。また屈折率は波長に依存するため次の経験式[33]を使って屈折率の波長依存性を考慮し必要な評価を行った。

$$n_{\text{liq}} - 1 = a \times \lambda^{-0.062} \rho_{\text{liq}} \quad (2)$$

ここで a , λ , ρ_{liq} はそれぞれ近似係数、光源の波長、液体水素の密度である。

2.3.3 固体水素の屈折率測定と残留気泡率の評価

初めにエアロゲル材を充填していないプリズムを使用して固体水素の屈折率測定を行った。本実験の屈折率測定はすべて飽和蒸気圧下で行われている。固体水素内に気泡を発生させないためにエアロゲルプリズムと同様の固化手順を採用した。プリズムに液体水素を充填した後、ヒーターを使用して上下の銅ブロックに0.33 Kの温度差を付けプリズム全体の温度を徐々に固化温度以下に冷却した。この実験では冷却ヘリウムガスの温度が13.60 Kになったとき下方から固化が始まり、温度の低下と共に固化が上方に広がった。この時、液体と固体の境界ではその密度差による干渉縞の変化を観測することができた。図7に成功した固化制御の一例を示す。供給ガスはノーマル水素（オルソとパラの存在比は75：25）であり、今回の実験では触媒を通さず常温から極低温へ急激に冷却するため、冷却後はその温度での存在比になるようオルソ水素からパラ水素への変換が徐々に起こる。屈折率の測定温度領域ではオルソ：パラの存在比は0.2：99.8である。そのため、安定した物性測定を行うためにはその存在比になるのを待たねばならない。そこで、冷却固化後の屈折率の時間変化を測定した。図8に固化直後からの屈折率の時間的な変化を示す。測定温度の存在比へと変換が終了し、屈折率が一定になるまでに約1日が必要であった。その後、上下の銅ブロックの温度差を維持したまま、その平均温度で約11 Kまで固体水素の屈折率を測定した。次に、温度を上昇させ固体から液体への転移の後、約16 Kまで液体の屈折率測定を行った。全測定の後、固体の屈折率を再度測定し屈折率の測定結果にオルソ-パラ変換の影響がないことを確認した。

図9に二つの波長に対する固体パラ水素の屈折率を示す。先に述べたように本実験では液相と固相の屈折率の比のみが評価可能であるため、液相での測定結果が過去の測定結果[32, 33]と一致するように調整している。液相での屈折率の温度依存性はその参照した過去の測定結果と一致しており、それは我々の測定方法に問題がないことを示している。一方、固相では我々の測定結果とPereraらが測定した屈折率：1.132(6.0 K, ~630 nm), 1.139(7.5 K, 632 nm)[34]とは矛盾はないように思われる。それにも関わらず屈

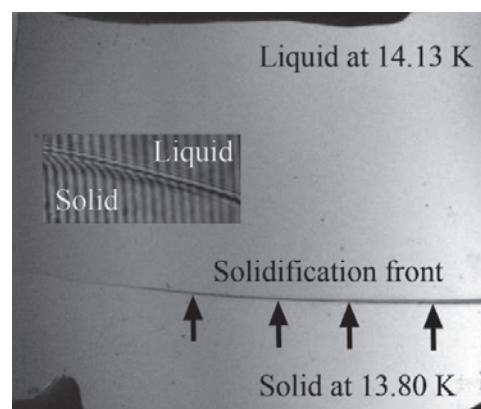


図7 エアロゲル材が充填されていないプリズム内での制御された固化の様子。液相と固相の界面で干渉縞のギャップが観測された（文献[29]からの引用）。

折率の温度の依存性に関しては、彼らの主張：屈折率には温度依存性が見られる、とは異なり我々の測定範囲では屈折率には温度の依存性がないように見える。ローレンツ-ローレンツの式によると

$$\frac{M(n^2 - 1)}{\rho(n^2 + 2)} = \frac{4}{3}\pi N_A \alpha \quad (3)$$

屈折率 n は密度 ρ と分極率 α の関数である。ここで M と N_A は分子量とアボガドロ数である。密度は温度の低下と共に上昇し、分極率は密度の上昇と共に、すなわち温度の低下と共に減少する[35]。この両者の特性が打ち消し合い、固体水素の屈折率に温度依存がみられなかった可能性

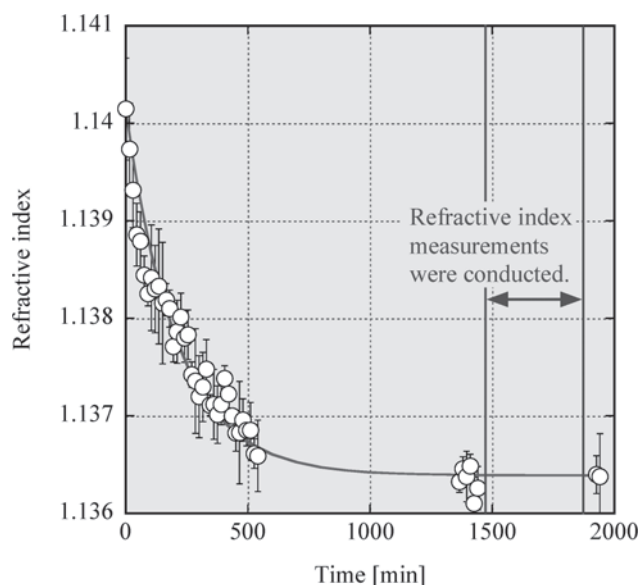


図8 オルソーバラ変換による屈折率の時間的変化。代表して波長 632.8 nm の測定結果が示されている。値が一定になった後、屈折率測定を行った（文献[29]からの引用）。

がある。測定結果より 11~13 K の範囲で分極率を計算してみると、両光源について $0.81 \sim 0.82 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ の範囲であった。これは van Straaten らによる評価[36]と矛盾していない。このように我々の測定結果は妥当であることが確認できた。

次にエアロゲルプリズムを使用した実験を行った。同様に室温におかれた水素を冷却し、エアロゲルプリズム内に液体水素を満たした後、上下の銅ブロックに 0.39 K の温度差を発生させ、その温度差を維持したまま冷却ヘリウムガスの温度を固化温度以下に徐々に低下させた。固化の制御はエアロゲルプリズムにおいても成功し、その冷却ヘリウムガス温度が 13.78 K の時に下方から固化が始まった。制御された固化の先端が上方に進展している様子を図10に示す。その固化が進展する速度を観測すると $\sim 0.005 \text{ mm/sec}$ であった。Lucas-Washburn の式[37]によると実験に使用しているエアロゲル材中での液体水素の浸透速度は

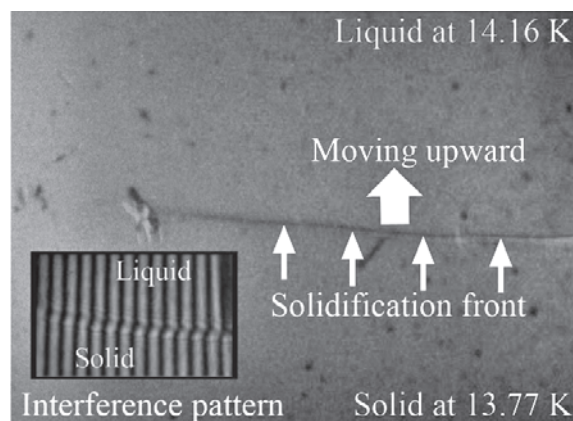
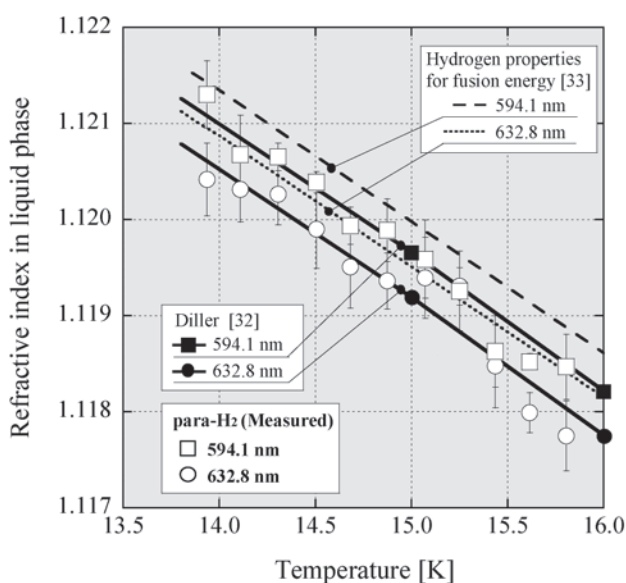
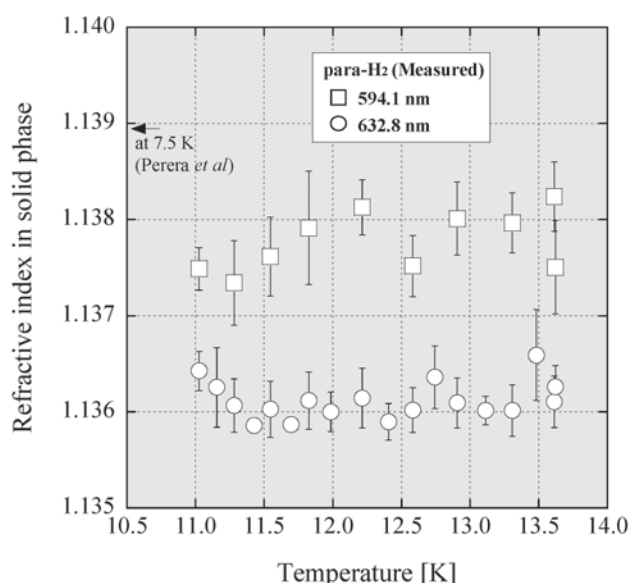


図10 エアロゲルプリズム内を制御された固化が進展する様子。液相と固相の界面で密度差が観測できる（文献[29]からの引用）。



(a) 液相の屈折率



(b) 固相の屈折率

図9 99.8% パラ水素の屈折率。(a)液相の屈折率、594.1 nm と 632.8 nm の波長に対する測定結果を過去の研究と比較[32, 33]、(b)固相の屈折率、文献[34]の測定値を比較として示している（文献[29]からの引用）。

～0.28 mm/sec であると予想されるが、これは実験で観測された固化の進展速度を上回っている。この結果から残留気泡発生抑制に必要な液体量が固液界面に供給されていたことが期待できる。また、干渉計でも液体と固体の界面が観測されているが、これは密度差分の液体水素が固液界面に供給され、その界面では固体の密度に変化しながら固化が進展していることを示している。このように我々の手法が残留気泡の抑制に有効であることが実験的にも確認でき、エアロゲル材内に無気泡の固体水素を形成できる可能性を示すことができた。この後、オルソ-パラの変換が完了するのを確認し、パラ水素の屈折率測定を行った。図11に固化完了後から1日間の屈折率の変化について観測した結果を示す。図中では240 minの時点で屈折率の飛びが見られるが、これは干渉計を再調整したためであり、物性の変化が反映されたものではない。この点を除くと屈折率はほぼ一定の値を示している。これは、安定な屈折率測定が可能になるまでに冷却後約1日間必要であった固体水素のみの場合とは異なる結果となっている。実験に使用しているエアロゲル材はオルソ-パラ変換の触媒として知られる活性炭と類似した化学組成や構造を有しており、エアロゲル材自身がオルソ-パラ変換の触媒として機能した可能性が考えられる[38]。その結果ノーマル水素がエアロゲル材に満たされると速やかにオルソ-パラ変換が完了したと推測できる。エアロゲル材中に存在する固体パラ水素の屈折率測定は先ほどと同様の手順で行った。

図12にエアロゲル材中に形成された固体パラ水素の見かけの屈折率測定結果を図9(b)の固体パラ水素の屈折率と比較して示す。全体的にパラ水素単体の屈折率より低い値となっている。これは密度が低い固体水素すなわち微量の気泡が含まれている固体水素が形成されている可能性があることを示している。その二つのプリズムで測定された屈折率の差からエアロゲル材中の固体の充填率 k を評価することができる。

$$k = \frac{n_{\text{sol2}} - 1}{n_{\text{sol1}} - 1} \quad (4)$$

ここで n_{sol1} , n_{sol2} はそれぞれエアロゲル材が充填されていないプリズムと充填されているプリズムで測定した屈折率である。評価の結果、今回の実験では充填率として約99%を達成していることがわかった。エアロゲル材を含浸している固体水素中に約1%の気泡が残留している可能性はあるが、温度制御を行わず固化を実行した場合に予測される充填率89%と比較すると大幅に改善されていることがわかる。このように我々の提案している手法は気泡の発生の抑制に有効であることがわかった。

先に評価した充填率は測定期間のうち前半に行われた測定を基に評価を行った結果である。しかし後半の測定結果による評価では若干高い充填率になる。ここではその点について考察する。固相の屈折率は13.3 K から、11.2 K まで温度を下げながらある温度間隔で測定され、その後、再度13.5 K まで温度を上げながら数点測定された。固相の屈折率測定終了後に液相の測定を行っている。全ての測定を終

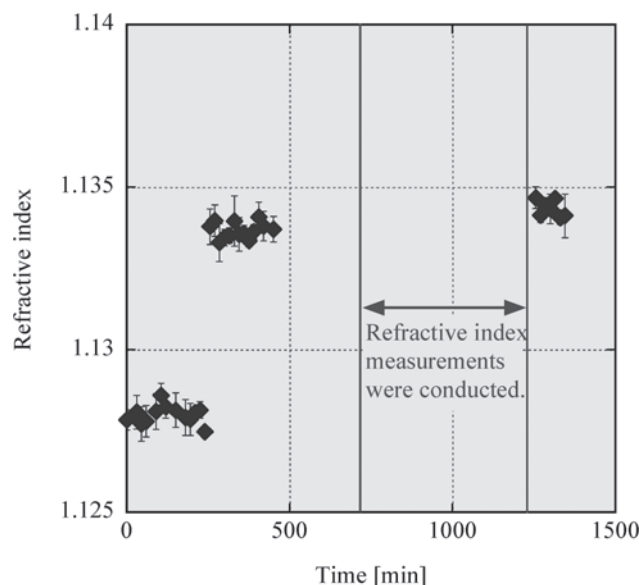


図11 エアロゲルプリズム内に形成された固体水素の屈折率の時間変化。代表して波長632.8 nmの測定結果が示されている(文献[29]からの引用)。

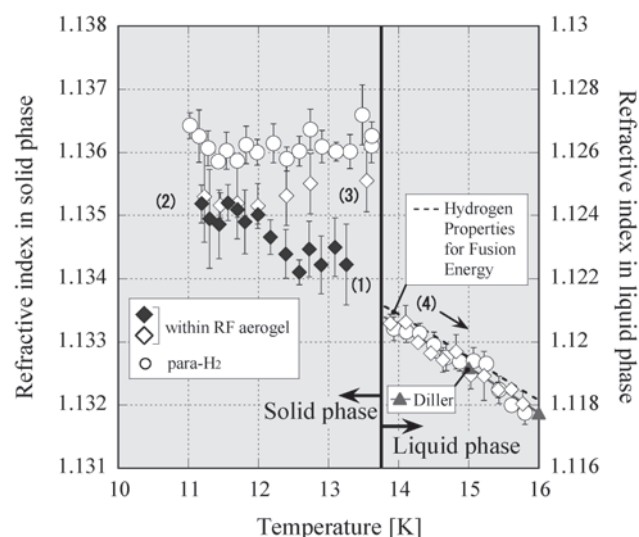


図12 エアロゲル材中に形成された固体パラ水素の見かけの屈折率の測定結果。図9(b)の固体パラ水素の屈折率と比較している。代表して波長632.8 nmの測定結果が示されている。(1)→(2)→(3)の順序で温度を変化させながら固相での屈折率測定を行った後、液相の測定(4)を温度を上げながら行った。◆は13.3 Kから温度を低下させながら測定した結果、◇は11.2 Kから温度を上げながら測定した結果(文献[29]からの引用)。

了するまでに約8時間かかった。以上の点を考慮して固相の測定結果を見ると、時間の経過または熱サイクルが固相の屈折率を上昇させているようにみえる。屈折率が変化する原因として二つの可能性が考えられる。一つ目はプリズムの状態に依存している。実験中はプリズムの温度勾配を維持しており、時間の経過とともにその温度勾配に従って残留気泡を埋めるように固体水素の再配分が起こっている可能性が考えられる。二つ目は、固体水素で含浸されたエアロゲル材が熱サイクルにより何らかの機械的な変化を起こしている可能性である。いずれにしても、屈折率が変化

する原因は明らかではなく、今後さらなる研究を必要とする

2.4 ターゲット形状への応用のためのシミュレーション

前章において実証に成功した固化手順を FIREX ターゲットの形状へ応用する方法を検討する。これまでにいくつかのグループが中心点火用ターゲットを対象として、シェル内の固体燃料の温度を外部から制御する方法について検討してきた。NIF の間接照射ターゲットでは二つの容器で構成されているホーラム部の、その二つの容器間で温度差を発生させ容器内の冷却ガスに温度勾配を付けることで燃料部の温度制御に成功している[39]。LLE ではフォームターゲットの温度制御について研究を行っている[40]。液体と固体の密度差が原因で固体中に形成された気泡とそれに伴うシェルの不透明化が問題となっている。固化時の冷却速度の最適化によりそれらの改善を試みているが、未だに無気泡固化の成功には至っていない。このように中心点火用のターゲットに関しては冷却ガスの温度制御がターゲットの温度を制御する唯一の方法である。一方、高速点火用ターゲットにはコーンガイドが取り付けられており、シェル内に温度勾配を発生させるには有利な構造である。これまでに PS シェルターゲットに対するコーンガイド加熱法の開発を行ってきたが、その技術に応用しエアロゲルプリズムと同様の温度勾配を実ターゲットのシェル内に実現可能かどうか検討する。

今回のシミュレーションには解析ソフトウェアの ANSYS を使用した。実験と同様に代替燃料の H_2 を仮定している。 H_2 の潜熱を考慮することで相変化の計算が可能になる。温度変化や燃料の相変化に伴う機械的な特性の変化については考慮しない。図13に FIREX ターゲットの軸対象モデルを示す。モデルの簡素化のために燃料充填管は省略されている。ターゲットは周囲のヘリウムガスによる自然対流で冷却されていると仮定する。熱量の効果について評価するためにコーンガイドへの入熱を $0.7 \times 10^{-5} \text{ W}$ から $1.4 \times 10^{-5} \text{ W}$ まで変化させる。今回採用した固化制御の過程は次の通りである。液体のパラ水素がフォーム層に浸透している状態から計算を始める。冷却ヘリウムガスの温度を 14.0 K から 10.0 K まで低下させるが、13.5 K まで 1.4 mK/sec、その後 11.8 K まで 13 mK/sec、最終的に 0.19 mK/sec の冷却速度とした。計算結果からコーンガイドへの入熱と固化の進展速度の関係について議論する。

コーンガイド加熱の結果、固化制御に成功した例を図14に示す。これは $1.4 \times 10^{-5} \text{ W}$ の入熱の場合で、固化がシェルの底部から始まりコーンガイドに向かって移動している途中の状態である。今回の仮定では固化の開始から全体の固化が完了するまでに 2300 sec 以上の時間が必要である。固化の進展速度はコーンガイド直近では 0.00024 mm/sec、シェルの底部では 0.00037 mm/sec であり、これは毛細管現象による液体水素の浸透速度 ($\sim 0.28 \text{ mm/sec}$) と比較して十分遅い。よって残留気泡の発生を抑制するために必要な液体水素量が供給可能である。一方、 $0.7 \times 10^{-5} \text{ W}$ の加熱ではコーンガイド直近で 0.00026 mm/sec、シェル底部で 0.00037 mm/sec である。高熱入力ではコーンガイド付近

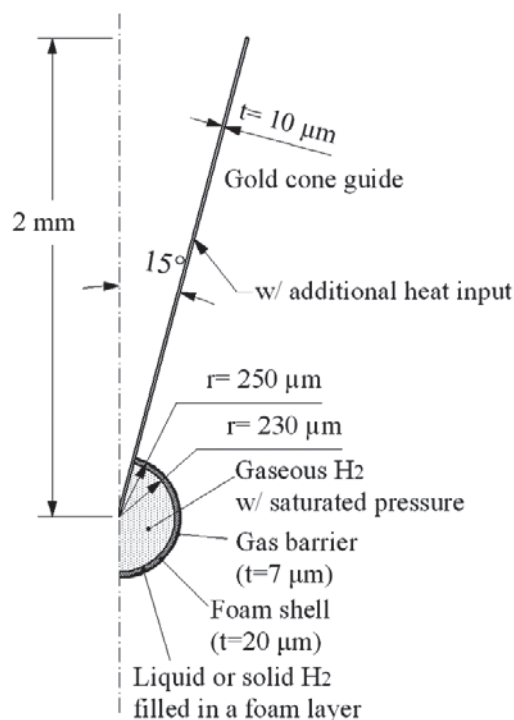


図13 FIREX フォームターゲットの軸対称シミュレーションモデル。シェルの熱伝達率は対流による角度依存が考慮されている[19]。最下部から30度間隔で次の熱伝達率を仮定している：83 W/m²K, 75 W/m²K, 67 W/m²K, 58 W/m²K, 42 W/m²K, 17 W/m²K。コーンガイドの熱伝達率は 0.44 W/m²K とした（文献[29]からの引用）。

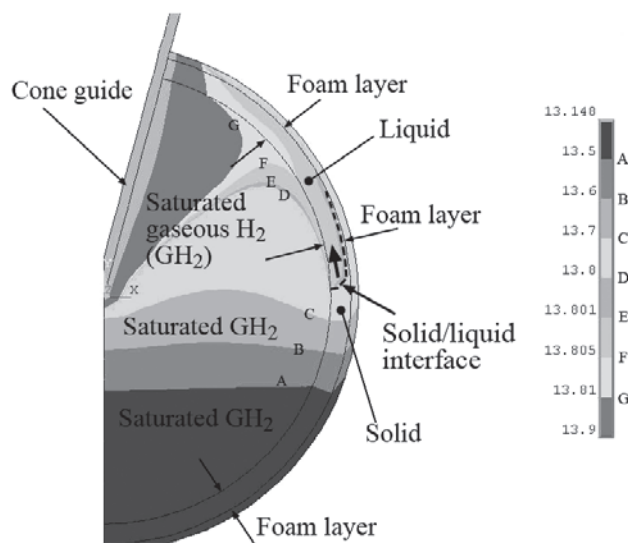


図14 コーンガイド加熱法による固化制御の成功例。図は冷却開始後 8800 sec の温度分布を示している。コーンガイドへの熱入力は $1.4 \times 10^{-5} \text{ W}$ である。点線は液相と固相の境界を示しており温度の低下と共にコーンガイドに向かい移動する（文献[29]からの引用）。

での固化進展速度を遅くする効果があることがわかる。シミュレーションの結果から判断するとコーンガイド加熱法は固化の進展速度を効果的に制御可能であり、プリズム形状により実験の原理実証に成功した無気泡固化の手順を FIREX ターゲットの形状にも応用可能であることが示された。

2.5 フォームシェル燃料の燃料充填量評価手法の開発

これまでに開発を行ってきた燃料充填量評価手法について簡単に述べる。実験では直径 800 μm 、フォーム層の厚さ 60 μm の試作フォームシェル（ゼネラルアトムクス社製）を取り付けたターゲットを使用した。また代替燃料の H_2 を使用した実験である。まず初めにフォームシェルに液体水素を充填している様子について図15に示す（図15は文献[41]に記載されており、そこからの引用である。また図16(a)–(c)も同様である）。(a)は充填前のシェル、(b)はフォーム層にほぼ100%液体水素を充填したと思われるシェルである。(c)は液体水素を過剰に充填した状態でコーンの周りにメニスカスを観測できる。(d)は(b)の状態から温度を下げフォーム層内の水素を固化した後、24時間経過した状態である。(a)と(b)を見比べると液体水素の充填によりフォーム層部の透過光が変化しているのがわかる。しかし、このわずかな変化から燃料の充填量を評価することは困難である。またフォーム材中に液体状燃料を充填する過程では、毛細管現象によりほぼ均一に広がりながら燃料の浸透が進むため、気層と液層の界面を確認するなどの充填量を直接評価する方法を利用することはできない。そこで、フォーム層内に充填された燃料の状態変化に伴い屈折率が変化することを利用した燃料充填量の評価方法を検討している。図15の各状態に対応して観測した干渉パターンを図16に示す。評価方法の詳細は文献[42]に詳しく説明されているので省略し、簡単に結果だけを紹介する。まず初めにこのフォームシェル自体の屈折率すなわちフォーム材（真空と基材の複合材）の屈折率を評価した結果、1.078であった。一方、ローレンツ–ローレンツの式か

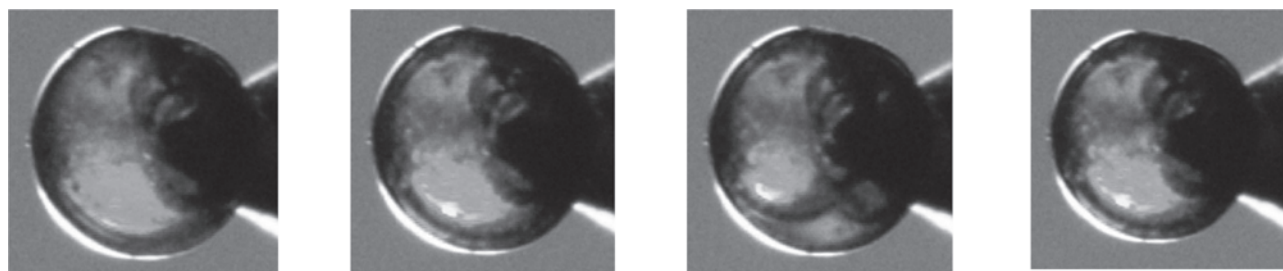
ら計算した屈折率は1.068であり、両者に矛盾はない。次に固体水素がほぼ100%フォーム層に充填されている場合（図16(d)）について評価すると、その屈折率は1.197であった。この評価結果は約10%の誤差を含んでいる。一方、固体水素の屈折率1.136と先ほどのフォーム材の屈折率1.078から複合則により固体水素が100%充填されたフォーム材の屈折率を計算すると1.196になる。このように固体水素がフォーム層に100%充填されている状態を実験的に評価することができた。いくつかの不確実性を含んでいるが、フォーム層を含浸している固体燃料の量を評価する手法として本手法は有効であることが示された。今後はフォームシェル寸法などの測定精度向上を含めて、レーザー核融合実験に必要な精度である1%以内の評価誤差をめざして開発を継続する。

2.6 フォーム法のまとめ

FIREX フォームクライオジェニックターゲットの固体燃料層形成手法および燃料層評価手法の研究開発の成果と課題を以下にまとめる。

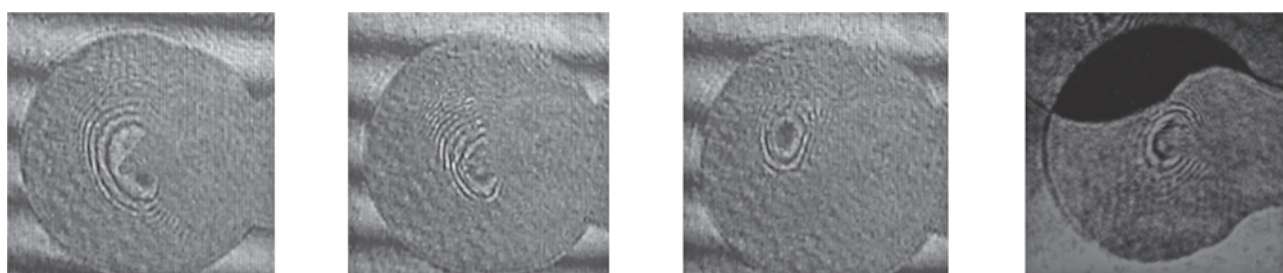
フォーム（エアロゲル）シェル内への無気泡固体燃料形成手法の研究開発では次の成果を得た。

- 1) 温度差を利用した固化制御による無気泡固化手法を提案し、エアロゲルプリズムと代替燃料の H_2 を使用した原理実証実験に成功。気泡率を $\sim 1\%$ まで低減できた。シェル材料の研究開発と連携しながらこの残留気泡率1%の原因究明と無気泡固化の実現をめざした研究を継続して行う。
- 2) 原理実証に成功した環境を FIREX フォームシェルターゲット内に実現可能であることが ANSYS を使用



(a) 空のフォームシェル (b) フォーム層へほぼ100%液体水素充填 (c) メニスカス観測 (d) 固化後24時間

図15 800 μm 試作フォームシェルターゲットへの液体・固体水素充填の様子(文献[41]からの引用)。



(a) 空のフォームシェル (b) フォーム層へほぼ100%液体水素充填 (c) メニスカス観測 (d) 固化後24時間

図16 800 μm 試作フォームシェルターゲットへの液体・固体水素充填時の干渉パターン。波長 632.8 nm の光源((a)–(c)は文献[41]から、(d)は文献[19]からの引用)。

したシミュレーションにより証明され、無気泡固体燃料層形成に必要な冷却条件などが明らかになった。その条件に従い実機 FIREX フォームシェルターゲットへの無気泡固体燃料層形成の実験的実証を今後行う予定である。

- 3) 気泡率評価に関連する計測により 99.8% 固体パラ水素の屈折率の測定を行った。

次に燃料層評価手法の研究開発については、これまでにフォームシェル内に形成された固体水素の屈折率からその充填量を評価する予備実験を行い、この手法が充填量の評価に有効であることを示した。今後も研究を継続するとともに、必要な基礎研究を進展させる。

3. コーンガイド加熱法の実証研究

第2章ではフォーム法に関する成果について述べた。実験およびシミュレーションによりフォームシェル内にほぼ無気泡の固体燃料層を形成する技術が実証された。フォーム法では、燃料層の均一性や燃料の充填量はフォームシェル自体の形成の正確さに依存する。現在、米国では直径数 mm のフォームシェルの大量生産技術が確立され製品として販売されているが、レーザー研で必要とする直径 500 μm のフォームシェルについては米国では開発が行われていない。シェルの小型化に伴い必要な技術はより高度になるためレーザー研では独自の研究開発を行っている。しかし高い正確さと同時に高精度のフォームシェルの大量生産技術は開発半ばである。そこで、米国の中心点火用ターゲットと同様にプラスチックシェル内に必要な燃料層を直接形成する技術開発を並行して行っている。

中心点火用ターゲットでは球対称性と燃料自身の発熱（ベータ線や赤外線加熱）を利用して固体燃料層の均一化を行っている。シェルの冷却状態が均一であることが求められる方法であり、その不均一性はそのまま燃料層の不均一性となることがわかっている。一方、高速点火用ターゲットには燃料を納める球形シェルにコーンガイドが取り付けられているため球対称性が崩れ軸対称となっている。よって、球対称性を持つターゲット用に開発された技術を利用することができない。そこで、コーンガイド加熱を利用した燃料層形成技術を提案し、その研究開発を行ってきた。本章では、試作ターゲットを使用した実証実験の成果について述べる。

3.1 コーンガイド加熱を利用した新しい燃料層形成手法の提案

コーンガイド加熱を利用した新しい燃料層形成手法を提案する。図17によりその手順を説明する（図17は文献[43]からの引用。図18, 19も同様。）。Step 1: 液体燃料をシェル内に導入する。表面張力の効果でコーンガイド周囲のみに局在する状態になる。その後、固化。Step 2: 固体燃料の移動に必要な温度差（飽和蒸気圧差）を発生させるために外部からコーンガイドを加熱する。固体燃料は暖かいコーンガイド周辺で昇華し、シェル内へと拡散、温度が低く飽和蒸気圧も低い場所で再固化する。シェルがほぼ均一に冷却されていればコーンガイド周辺を除きほぼ均一な燃料層

が形成される。Step 3: 固体燃料がなくなったコーンガイド周囲に燃料を供給する。液化温度まで温度を上昇させコーンガイド周辺から燃料充填管内までを液体状態とし必要な量の液体燃料を追加、その後温度を下げ再固化させる。この作業中 Step 2 で形成された固体燃料層はそれ自体の熱容量によりその状態を維持している。必要な燃料層になるまで Step 2 ~ Step 3 を繰り返す。

3.2 コーンガイド加熱法実証実験

3.2.1 実験条件

本実験に使用した試作 PS シェルターゲットの写真を図18に示す。ターゲットは直径 2 mm の PS シェル、金製コーンガイド、ガラス製燃料充填管で構成されている。重力に対する軸対称性を維持するためにコーンガイドはシェルに対して垂直上方に配置した構成となっている。ターゲットは計測用ガラス窓付きの冷却装置[31]に取り付けられヘリウムガスにより冷却される。ターゲットを納める容器には温度可変型のふく射シールドが取り付けられており、その温度を制御することで冷却ヘリウムガスの温度を制御している。外部に置かれた 5 mW He-Ne レーザー光線がガラス窓を通してコーンガイドを加熱する。その加熱エネルギーを調整するため、減光フィルターの ND20 と ND30 を直列に挿入した。さらに電気制御式シャッターの開閉時間の調整によりレーザー光の照射を間欠的に行い加熱量の調整を行った。今回の実験ではシャッターの開閉時間をそれぞれ 7 秒と 5 秒とした。第2章と同様の理由で代替燃料として H_2 を使用して実験を行った。今回の実験条件ではオルソーパラ変換による発熱は他の熱源と比較して小さく、実験結果に影響しない程度である。

3.2.2 燃料層形成実証実験

試作ターゲットを使用した原理実証実験について述べる。図17で提案した各 Step を実験的に実証した結果が図19に示されている。水素ガス供給・液化時に温度可変シールドの温度は 13.40 K に制御されていたが、この値はすでに三重点以下であるため、シェル内の温度とは一致していないと思われる。PS の熱伝導率が低く、その熱抵抗により温度差が生じていることが理由として考えられる。よって、本実験に関する温度情報は目安として参照していただきたい。水素ガスの供給圧を三重点における飽和蒸気圧を超える程度に上昇させるとコーンガイドの周りに液体水素が充填され始め、メニスカスを観測できる。その液体水素の塊が重力の影響を受けシェル下部へと移動しない程度まで水素を充填する。次に冷却ガス温度を 13.20 K に下げ、その状態を維持しながら水素全体の固化を完了させた（図19(a)参照）。透明な固体水素が形成されているのがわかる。コーンガイドのレーザー加熱中に固体が融解するのを避けるため冷却ガス温度を 13.10 K に制御しながら、先に述べた条件でレーザー光を間欠的に照射した。図19(b)と(c)は2回目の Step 2（図17の(b)と(c)）の状態を示している。コーンガイド加熱の結果、コーンガイド周辺の固体水素が昇華し、シェル内へとほぼ均一に拡散・固化している様子がわかる。その空いた周囲に固体水素を追加するために、冷却ガス温度を 13.40 K へと再度升温し液体水素を供

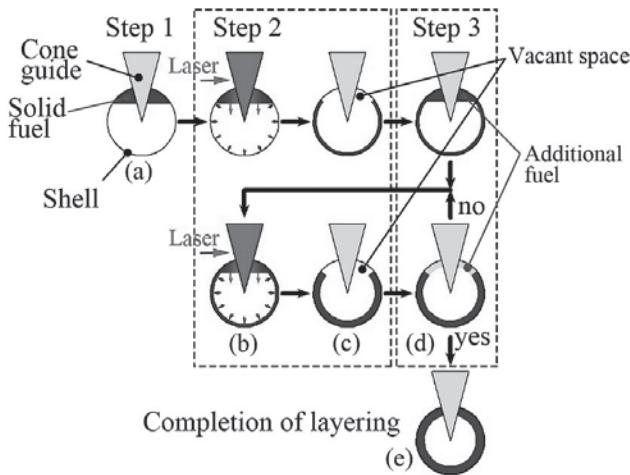


図17 コーンガイド加熱を利用した新しい燃料層形成手法。ターゲットは周囲のヘリウムガスにより冷却され、各Stepでは必要な温度に制御される（文献[43]からの引用）。

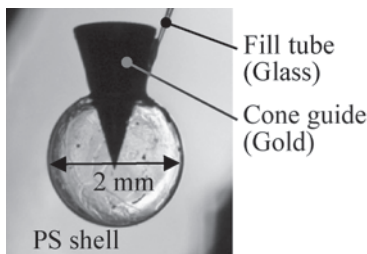


図18 直径2 mm PS シェル付き試作ターゲット（文献[43]からの引用）。

給後、13.20 K に再冷却し全体を再固化させた。図19(d)はその結果を示しているが、液化温度への昇温、再冷却後も固体水素はほぼそのままの外見を維持していることがわかる。また図19(c)と(d)を比較すると、この昇温過程は水素の氷の表面を平滑化する効果も期待できる。必要な水素層厚さの形成はStep 2～3を繰り返すことで可能になる。最終的に形成された固体水素層が図19(e)に示されている。今回の場合、液体水素再充填を4度繰り返し、全工程は8時間であった。屈折率を考慮せず写真を基に直接測定した結果、固体層の厚さは132～223 μm であった。コーンガイド直近では水素層厚の不均一性が目立っているが、これは燃料充填管の挿入や組立時の接着剤により表面エネルギーが変化しているためであると思われる。その表面エネ

ギーの不均一が液体水素の充填時に水素層厚の違いを生み、最終的な結果にも影響しているようである。仮にその影響部分を無視すると固体水素層厚さは155～192 μm の範囲に収まる。内面の欠陥などについては同様に約30 μm であると評価した。今回の実証実験では必要な仕様を満たす精度で固体水素層を形成することができなかったが、軸対称性を持つターゲットに対して均一な燃料層を形成する手段としてコーンガイド加熱法は有効であることが実証された。

3.3 燃料層の評価手法

PS シェル内に形成された燃料層の評価については米国で研究開発が行われている方法を応用可能だと考えている。これまでLLEのOMEGAやNIFに供給されているターゲットのうち可視光による光学計測が可能なシェルについてはシャドウグラフ法[16]、NIF用ターゲットのようにベリリウムがコーティングされた不透明なシェルについてはX線位相コントラスト法[17]による評価が行われている。LLEではサブミクロン精度の解像度をもつシャドウグラフ法を開発している。一つの光学系によりシェルの異なる角度から撮影した複数のシャドウグラフ画像を再構成することでシェル全体の不均一性を3次元的に確認できる評価手法の開発に成功している。その成果、燃料層全体の均一性の評価は2次元的な計測のみでは不十分であることが明らかになっている。またNIF用のターゲット評価ではX線位相コントラスト法により0.4 μm （二乗平均平方根RMS）の表面荒さの計測に成功しており、レーザー実験に必要な仕様を満たしたターゲットの選択・供給が行われている。

一方、高速点火方式用ターゲットはコーンガイド自体が最大の不均一性の要因となっており、中心点火方式と比較して燃料層に必要とされる均一性が緩和される。高精度計測が必要な中心点火方式用に開発された上記方法をそのままFIREXターゲット用に転用可能なはずである。このように中心点火方式用ターゲットのために開発された手法ではあるが、フォームシェルを使用しないFIREXターゲットでは同様の計測技術を使用することができると考えており、現状ではその他新たな燃料層評価手法について検討を行っていない。

3.4 コーンガイド加熱法のまとめ

我々独自のアイデアにより研究開発を行っているコーンガイド加熱法について直径2 mm PS シェル試作ターゲット

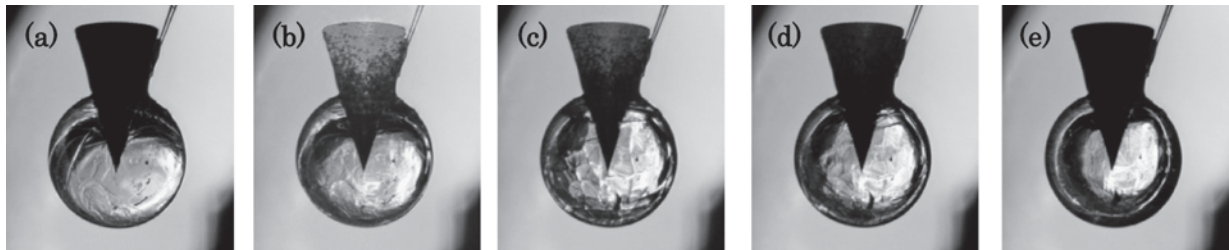


図19 図17において提案した各Stepを実験的に実証した。(a)水素充填後固化した様子。コーンガイド周囲のみならず全体的に薄い固体水素層が形成されているのがわかる。(b)2回目のコーンガイド加熱。(c)コーンガイド周囲からシェル内へ固体水素が移動した後の様子。(d)コーンガイド周囲に液体水素を追加後、再固化した後の様子。(e)4回の液体水素充填後、最終的に形成された固体水素層（文献[43]からの引用）。

を用いた原理実証実験を行い、次の成果を得た。

コーンガイドの加熱にレーザー光を利用した実証実験を行った。レーザー光による加熱は燃料層の再配分に必要な温度差をシェル内に発生可能であることがわかった。

PS シェル内に均一な燃料層形成するために我々が提案した手順の実証実験を行い、直径 2 mm のシェル内に厚さ 155~192 μm 、表面荒さ約 30 μm 以下の均一性を持つ固体水素層の形成に成功した。

このようにコーンガイド加熱による PS シェルターゲットへの均一燃料層形成の原理実証に成功した。今後は直径 500 μm PS シェルが取り付けられた実機 FIREX ターゲットへの技術移転を検討し、その実証実験を行う予定である。また、米国などで開発された燃料層評価手法を FIREX ターゲットに応用するための検討を開始する。

4. FIREX 用クライオジェニックターゲット開発のまとめと今後の計画

レーザー研と核融合研は2003年度から開始した双方向型共同研究により FIREX クライオジェニックターゲットへ応用するための二つの燃料層形成手法：フォームシェル法およびコーンガイド加熱法、について研究開発を行っている。これまでに、両手法の原理実証実験に成功し、その技術をレーザー実験へ供給される実ターゲット用に調整する最終段階に至っている。このように、双方向型共同研究の枠組みより両研究機関の経験、知識、人材や装置を有効に利用した結果、クライオジェニックターゲットの研究開発は順調に進んでいる。今後も現状の協力体制の下、形成された燃料層の評価方法の開発も同時に発展させながら、関連する基礎研究と共に燃料層形成手法の研究開発を継続する。数年後にはクライオジェニックターゲットをレーザー実験に供給することをめざしている。

次に、レーザー実験へのターゲット供給を実現するために専用装置の開発を開始する。これまでは核融合研に設置したオフサイトのターゲット冷却専用装置においてターゲット開発を行ってきたが、レーザー実験に使用するターゲットはレーザー研に新たに建設される予定の専用装置で冷却・燃料層形成が行われることになる。その装置ではレーザー照射まで実行可能な機能が求められる。また、オフサイトの冷却専用装置とは異なり使用できる空間が限られるため、温度や圧力の複雑な制御を実現する構造ではなく単純化された装置である必要がある。クライオジェニックターゲットの燃料層形成の原理実証が終了したことを受け、これまでにオフサイトで研究開発を行ってきた技術を簡略化し建設予定のレーザー実験専用装置に移転するための検討を開始すると共にその装置の設計を開始する。

さらに必要な仕様を満たしたターゲットの安定供給を実現するために次の課題についても検討を開始する。

- 1) 大量生産された数多くのシェルからよいものを選択できる常温使用の重水素化シェルターゲットとは異なり、固体燃料層を形成したターゲットをそのまま実験に使用しなければならないクライオジェニックターゲットは必要な仕様を満たしていない場合があること

が予想される。そこで、固体燃料層を形成した後に仕様を満たしていないことが判明したターゲットに対して、その燃料層に必要な仕様に合わせ再調整する技術の開発が必要である。

- 2) 本研究の成果により FIREX クライオジェニックターゲットのシェルとして必要な条件が明らかになってきた。シェル自体の完成度は燃料層の均一性にも影響するため、これまでのシェル開発の視点[44] から一歩進み、燃料層形成技術とシェル材料の研究開発を同期させターゲットの完成度を高める。

5. 謝 辞

シェル材料の構造に関するコメントをいただきました東京工業大学の長井圭治准教授、RF エアロゲルの SEM 写真を提供していただきました大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの藤本靖博士に感謝いたします。

参考文献

- [1] R. Kodama *et al.*, *Nature* **412**, 798 (2001).
- [2] H. Azechi *et al.*, *Nucl. Fusion* **49**, 104024 (2009).
- [3] K. Mima *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **52**, 124047 (2010).
- [4] H. Shiraga *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **53**, 124029 (2011).
- [5] S. Fujioka *et al.*, *Plasma Phys. Control. Fusion* **54**, 124042 (2012).
- [6] T. Nakamura *et al.*, *Phys. Plasmas* **14**, 103105 (2007).
- [7] T. Johzaki *et al.*, *Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference* (Daejeon, Republic of Korea, 11-16 October 2010) IFE/P 6-01 (2010).
- [8] L.J. Atherton, *J. Phys. Conf. Ser.* **112**, 032063 (2008).
- [9] T.C. Sangster *et al.*, *Phys. Plasmas* **14**, 058101, (2007).
- [10] J.D. Lindl, *Nucl. Fusion* **51**, 094024 (2011).
- [11] T.C. Sangster *et al.*, *Nucl. Fusion* **47**, S686 (2007).
- [12] J.K. Hoffer and L.R. Foreman, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 1310 (1988).
- [13] A.J. Martin *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.* **A6**, 1885 (1988).
- [14] D.N. Bittner *et al.*, *Fusion Technol.* **35**, 244 (1999).
- [15] G.W. Collins *et al.*, *J. Vac. Sci. Technol.* **A14**, 2897 (1996).
- [16] D.H. Edgell *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* **49**, 616 (2006).
- [17] D.S. Montgomery *et al.*, *J. Phys IV France* **133**, 869 (2006).
- [18] R.A. Sacks and D.H. Darling, *Nucl. Fusion* **27**, 447 (1987).
- [19] A. Iwamoto *et al.*, *J. Phys. Conf. Ser.* **112**, 032067 (2008).
- [20] J.K. Hoffer *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* **50**, 15 (2006).
- [21] P.C. Souers, *Hydrogen Properties for Fusion Energy* (Berkeley: University of California Press, 1986) p.80.
- [22] F. Ito *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, L335 (2006).
- [23] K. Nagai *et al.*, *Nucl. Fusion* **45**, 1277 (2005).
- [24] T. Fujimura *et al.*, *J. Phys. Conf. Ser.* **244**, 032038 (2010).
- [25] K. Nagai *et al.*, *Nucl. Fusion* **49**, 095028 (2009).
- [26] H. Homma *et al.*, *Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference* (Daejeon, Republic of Korea, 11-16 October 2010) IFE/P 6-27 (2010).
- [27] T. Fujimura *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **4**, S1010 (2009).
- [28] 乗松孝好ら：プラズマ・核融合学会誌 **85**, 755 (2009).
- [29] A. Iwamoto *et al.*, *Nucl. Fusion* **53**, 083009 (2013).

- [30] A. Iwamoto *et al.*, Plasma Fusion Res. **6**, 240407 (2011).
- [31] A. Iwamoto *et al.*, Fusion Eng. Des. **81**, 1647 (2006).
- [32] D.E. Diller *et al.*, J. Chem. Phys. **49**, 3096 (1968).
- [33] P.C. Souers, *Hydrogen Properties for Fusion Energy* (Berkeley: University of California Press, 1986) p.70.
- [34] M. Perera *et al.*, Optics Letters **36**, 840 (2011).
- [35] B.A. Younglove, J. Chem. Phys. **48**, 4181 (1968).
- [36] J. van Straaten J and I.F. Silvera, Phys. Rev. B **37**, 1989 (1988).
- [37] E.W. Washburn, Phys. Rev. **17**, 273 (1921).
- [38] C.A. Swenson, J. Chem. Phys. **18**, 520 (1950).
- [39] J.D. Moody *et al.*, J. Phys. IV France **133**, 863 (2006).
- [40] H.R. Harding *et al.*, LLE Review **114**, 57 (2008).
- [41] A. Iwamoto *et al.*, *Proc. 21rd IAEA Fusion Energy Conference* (Chengdu, China, 16-21 October 2006), IF/P5-1 (2007).
- [42] T. Fujimura *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **112**, 032066 (2008).
- [43] A. Iwamoto *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **244**, 032039 (2010).
- [44] 長井圭治ら：プラズマ・核融合学会誌 **80**, 626 (2004).